

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

УДК 615.47:616–072.7

DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-6

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ЭПИКАРДА

М. Н. Крамм

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SELECTING THE ELECTRODES NUMBER ON RESULTS OF RECONSTRUCTION OF ELECTRICAL POTENTIAL DISTRIBUTION ON THE EPICARD SURFACE

M. N. Kramm

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Целью работы является повышение пространственного разрешения при анализе электрической активности сердца путем реконструкции карт распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда. Используются электрокардиосигналы многоэлектродной системы на поверхности торса человека и геометрические характеристики поверхности торса. Рассматривается вопрос о влиянии выбора количества электродов на результаты реконструкции карты распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда. На примере модельной задачи проводится сравнение карт электрического потенциала, полученных путем реконструкции по потенциалам на поверхности торса, и карт, полученных прямым расчетом. Исследование актуально в задачах повышения информативности электрокардиографических обследований путем реконструкции параметров эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС). *Методы.* В рамках модели электрической активности сердца с неоднородностями различных размеров анализируются карты распределения электрического потенциала на эпикарде, полученные путем решения обратной задачи по потенциалам, зарегистрированным на поверхности торса. *Результаты и выводы.* Проведено сравнение карт электрического потенциала на поверхности эпикарда, полученных путем реконструкции по потенциалам на поверхности торса, и карт, полученных прямым расчетом. Рассмотрено влияние выбора количества электродов на результаты реконструкции карт распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда. Получены оценки количества электродов для различных размеров неоднородностей в распределении потенциала. Необходимое для регистрации потенциала количество электродов и оптимальный коэффициент регуляризации существенно зависят от размера неоднородности на карте распределения потенциала. Для реконструкции неоднородностей размером 3 см и более достаточное число электродов порядка 40, для более мелких неоднородностей – до 60 и более.

Ключевые слова: карта распределения электрического потенциала, электроды, торс, эпикард, реконструкция, коэффициент регуляризации.

© Крамм М. Н., 2020

Abstract. Subject and goals. The aim of this study is to increase spatial resolution in the analysis of the heart electrical activity by reconstructing the maps of the electric potential distribution on the epicardium surface. The electrocardiograms of the multi-electrode system on the human torso surface and the geometric characteristics of the torso surface are used. We consider the influence of the choice of the electrodes number on the results of reconstruction of the electric potential distribution map on the epicardium surface. Using the model object, as an example, we compare the electric potential maps obtained by reconstruction according to potentials on the torso surface and the maps obtained by direct calculation. The study is relevant in the tasks of increasing the information content of electrocardiographic examinations by reconstructing the parameters of an equivalent electric heart generator (EEHG). **Methods.** In the framework of the model of heart electrical activity with inhomogeneities of various sizes, we analyze maps of the electric potential distribution on the epicardium, obtained by solving the inverse problem under potentials, recorded on the torso surface. **Results and conclusions.** We present the results of comparing electric potential maps on the epicardium surface, obtained by reconstruction according to potentials on the torso surface, and the maps, obtained by direct calculation. The influence of the choice of the electrodes number on the results of reconstruction of the electric potential distribution map on the epicardium surface is considered. Estimates of the number of electrodes for various sizes of inhomogeneities in the potential distribution are obtained. The number of electrodes required for recording the potential and the optimal regularization coefficient substantially depend on the size of the inhomogeneity on the potential distribution map. For reconstruction of inhomogeneities of 3 cm or more in size, a sufficient number of electrodes is of the order of 40, for smaller inhomogeneities – up to 60 or more.

Keywords: electric potential distribution map, electrodes, torso, epicardium, reconstruction, regularization coefficient.

Введение

Одной из значимых задач электрокардиологии является повышение информативности электрокардиографических (ЭКГ) обследований с помощью многоэлектродных отведений. Известны работы по картированию электрического потенциала на поверхности торса [1, 2]. Однако при переходе от электрических источников миокарда к потенциалам на поверхности торса происходит потеря мелких деталей в связи с эффектом подавления верхних пространств частот потенциала [3, 4]. Отсюда вытекает актуальность обратной задачи электрокардиографии, которая ориентирована на реконструкцию эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС), в частности карт потенциала на поверхности эпикарда (КППЭ) по электрическим потенциалам на поверхности торса, зарегистрированным с помощью многоэлектродной системы кардиоотведений [5, 6]. Для целей ранней диагностики нарушений в процессах распространения возбуждения и реполяризации в миокарде важно располагать картами распределения параметров электрической активности на поверхности сердца для различных моментов времени кардиоцикла.

Рассматривается многоэлектродная программно-аппаратная ЭКГ система, содержащая 40–80 электродов, размещенных равномерно на поверхности торса [4]. Система включает блок регистрации многоканальных электрокардиосигналов (ЭКС), блок предварительной обработки ЭКС, блок определения координат электродов, блок интерполяции координат и потенциалов на поверхности торса, блок реконструкции ЭЭГС, блок визуализации.

Поскольку задача реконструкции КППЭ относится к обратным задачам электрокардиографии, решение обладает определенной неустойчивостью, когда малые погрешности в представлении данных (потенциалы на поверхности торса, погрешности дискретизации) и погрешности в геометрических па-

параметрах задачи могут приводить к заметным погрешностям в оценке пространственно-временной динамики сердца [7, 8]. В этих условиях решающее значение приобретает вопрос качества представления исходных данных и прежде всего вопрос выбора количества электродов для адекватного представления распределения потенциала на поверхности торса. Данную задачу необходимо рассматривать совместно с оптимизацией режима реконструкции при решении обратной задачи с помощью регуляризующих алгоритмов [7, 9]. В настоящей работе использовался метод усеченного сингулярного разложения (TSVD), который потенциально имеет схожие свойства с методом регуляризации Тихонова [9, 10].

Метод реконструкции карты потенциалов на поверхности эпикарда

Исходными данными для обработки являются записи электрокардиосигналов многоканальных кардиоотведений. Электроды располагаются на поверхности торса с помощью надеваемого на торс «многоэлектродного жилета» (см., например, [4, 5]). Для получения КППЭ надо провести реконструкцию ЭЭГС, располагая записанными потенциалами с электродов на поверхности торса для сетки моментов времени кардиоцикла. После интерполяции записанных потенциалов в текущий момент времени на мелкой сетке на поверхности торса получаем вектор $\phi^b = [\phi_1^b, \phi_2^b, \dots, \phi_{N_b}^b]$, где N_b – количество точек дискретизации поверхности торса [11], $N_b \approx 10^3$. Эквивалентный электрический генератор сердца поверхностного типа характеризуется распределениями электрического потенциала $\phi^h = [\phi_1^h, \phi_2^h, \dots, \phi_{N_h}^h]$ и нормальной производной электрического потенциала $g^h = [\partial\phi_1^h/\partial n, \partial\phi_2^h/\partial n, \dots, \partial\phi_{N_h}^h/\partial n]$ на поверхности эпикарда [11, 12], $N_h \approx 10^3$ – количество точек на мелкой сетке на поверхности эпикарда. Связь между этими распределениями и регистрируемым распределением потенциала на поверхности торса имеет интегральный характер и вытекает из уравнения Лапласа для области между поверхностями эпикарда и торса [8, 12]. Интегральные соотношения можно свести к системе матричных линейных алгебраических уравнений, в которых матрицы связывают ϕ^h и g^h с ϕ^b . Итерационная процедура решения этой системы уравнений [4] предполагает вычисление обратных матриц (обращение матриц) и в предлагаемом варианте обращение матрицы G^{hb} с элементами $G_{ij}^{hb} = (1/R_{ij})\Delta S_j^h$, где ΔS_j^h – площадь элементов поверхности эпикарда; R_{ij} – расстояние между элементами поверхностей торса и эпикарда с номерами i и j .

Матрица G^{hb} является плохо обусловленной с коэффициентом обусловленности $\text{cond} \approx 10^{11} - 10^{14}$, поэтому прямое обращение матрицы G^{hb} порождает неустойчивость по отношению к погрешностям записи и оцифровки потенциалов, а также к погрешностям задания геометрии сеток на торсе и эпикарде.

Устойчивое решение может быть получено с использованием метода усеченного сингулярного разложения TSVD [9], когда регуляризованная обратная матрица представляется в виде

$$(\tilde{G}^{hb})^{-1} = V\tilde{R}^+U^T, \quad (1)$$

где U , V – ортогональные матрицы сингулярного разложения матрицы G^{hb} , $R^+ = \text{diag}(\tilde{\rho}_1^+, \tilde{\rho}_2^+, \dots, \tilde{\rho}_M^+)$; $M = \min(N_h, N_b)$,

$$\tilde{\rho}_i^+ = \frac{\rho_i}{\alpha + \rho_i^2}; \quad (2)$$

ρ_i – сингулярные числа матрицы G^{hb} ; α – коэффициент регуляризации. При $\alpha = 0$ обратная матрица будет нерегуляризованной. Для достаточно больших сингулярных чисел $\alpha < \rho_i^2$ регуляризация практически не сказывается, для малых сингулярных чисел $\alpha > \rho_i^2$, что ограничивает влияние неустойчивостей в формуле (2). Целью дальнейшего исследования был анализ влияния режима регуляризации на КППЭ, реконструированных по картам потенциала на поверхности торса при разном количестве измерительных электродов.

Результаты анализа влияния количества электродов

При малом количестве точек в матрицах принципиально нельзя описать верхние пространственные частоты в спектре потенциала на эпикарде. Поэтому ошибку в представлении спектра можно уменьшить, увеличив число точек дискретизации на торсе и эпикарде N_b и N_h и проведя процедуру интерполяции распределения потенциала на торсе при неизменном количестве электродов [3]. Однако при этом возрастает вклад погрешности интерполяции потенциалов на торсе из-за неустойчивостей при обращении матриц в процедуре реконструкции карты потенциалов на эпикарде по потенциалам торса. Для снижения этого эффекта следует увеличивать количество электродов в технически разумных пределах. Рассмотрим влияние выбора количества электродов на результаты реконструкции.

Для контроля погрешности реконструкции карт электрического потенциала на поверхности эпикарда необходимо, строго говоря, располагать известным распределением потенциала на эпикарде. В этих условиях, при отсутствии баз данных с распределениями потенциала на торсе и эпикарде, для анализа алгоритма регуляризации мы провели математическое моделирование единичных неоднородностей на примере дипольной модели электрического источника внутри эпикарда [8]. Поскольку основным вопросом была оценка влияния количества электродов, были выбраны модельные представления поверхности торса в виде эллиптического цилиндра с полуосями a и b и поверхности эпикарда в виде сферы радиусом R_h (сферический квазиэпикард, окружающий реальное сердце [5,8]). Размер неоднородности варьировался путем смещения центра дипольного источника в горизонтальном направлении относительно центра сферического квазиэпикарда при радиусе $R_h = 6$ см: чем ближе модельный источник к поверхности эпикарда, тем меньше размер пятна. Для оценки размера неоднородности dr рассчитывались пространственные спектры потенциала на поверхности квазиэпикарда [3]. При этом $dr = 1/k_{bnd}$, где k_{bnd} – граничная пространственная частота в пространственном спектре потенциала, взятая по уровню 0,01. Для снижения ошибок дискретизации распределений потенциала на торсе и эпикарде использовались количества точек $N_b \approx N_h \approx 10^3$ в (1), (2).

Поскольку при изменении уровня погрешностей в представлении исходных данных изменяется величина оптимального коэффициента регуляризации [7, 9], для каждого значения количества электродов N_e проводился поиск оптимального коэффициента регуляризации α . При этом оптимум определялся из условия максимальной величины коэффициента корреляции между модельным и реконструированным распределениями электрического потенциала.

На рис. 1 показана зависимость нормированного коэффициента взаимной корреляции C_h (коэффициент корреляции Пирсона) между модельным и реконструированным распределениями электрического потенциала на эпикарде от количества электродов на поверхности торса для разных размеров неоднородности. На рис. 2 представлена зависимость оптимального коэффициента регуляризации от количества электродов, полученная при этих же условиях.

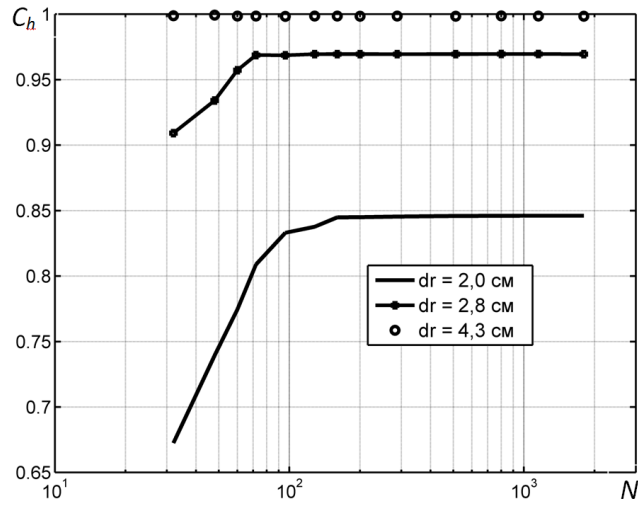


Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляции C_h от количества электродов при разных размерах неоднородностей

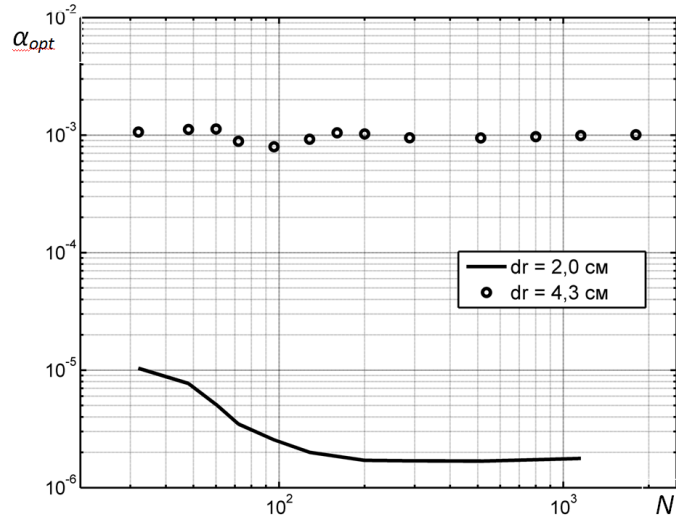


Рис. 2. Зависимости оптимального коэффициента регуляризации от количества электродов при разных размерах неоднородностей

В соответствии с рис.1 в области $N < 100$ возрастает влияние погрешности интерполяции из-за ограниченного количества точек съема потенциала на торсе и значение выбора количества электродов становится существенным, особенно для неоднородностей с размерами 3 см и менее, когда для подавления неустойчивостей реконструкции из-за погрешности интерполяции приходится увеличивать коэффициент регуляризации (см. рис. 2). В области $N > 100$ на выбор коэффициента регуляризации уже влияет практически только размер неоднородности. В целом, ориентируясь на уменьшение коэффициента корреляции при уменьшении числа электродов, можно заключить, что для реконструкции неоднородностей размерами 3 см и более достаточно число электродов порядка 40, для более мелких – до 80 и более.

Отмеченные особенности согласуются с зависимостями граничной частоты в пространственных спектрах распределения потенциала на эпикарде от количества электродов (рис. 3). Так, при $N = 40$ граничная частота k_{bnd} в реконструированном распределении меньше граничной частоты, полученной по модели при $dr = \frac{1}{k_{bnd}} = 4,3$ см в $\gamma = 1,1$ раза и при $dr = 2$ см уже в 1,9 раза. В то же время при $N = 100$ $\gamma = 1,05$ для $dr = 4,3$ см и $\gamma = 1,5$ для $dr = 2$ см.

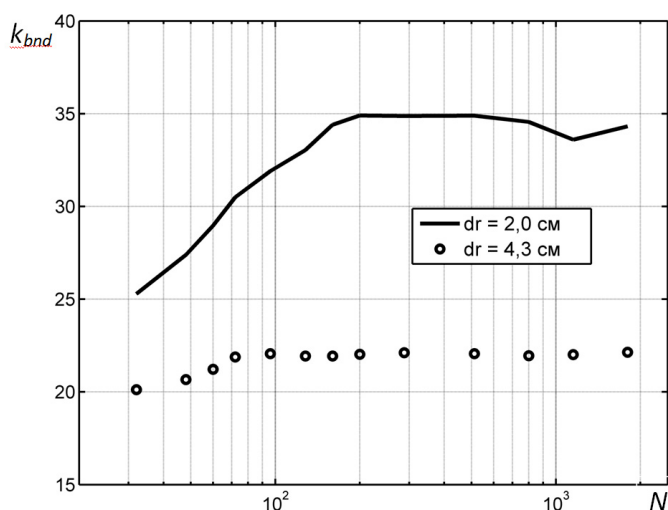


Рис. 3. Зависимость граничной частоты в пространственном спектре реконструированной КППЭ при разных размерах неоднородностей

Обсуждение

В рамках проведенного исследования можно заключить, что для неоднородностей в распределении потенциала на эпикарде с размерами более 3 см при количестве электродов более 100 погрешность интерполяции потенциалов на торсе в целом перестает влиять на результаты реконструкции КППЭ. В этой области на первое место выходят погрешность дискретизации, погрешность оцифровки сигналов и шумы. Однако для снижения погрешности дискретизации необходимо увеличивать количество точек разбиения поверхностей торса и эпикарда с $N_b \approx N_h \approx 10^3$ до $N_b \approx N_h \approx 10^4$, что потребует при современной производительности ПК неприемлемых временных затрат на

реконструкцию (десять минут). Переход от 2-байтового представления чисел к 8-байтовому представлению снижает относительную погрешность квантования от $2 \cdot 10^{-10}$ (соизмеримо со степенью обусловленности матриц в процедуре реконструкции) до $5 \cdot 10^{-20}$, однако требует уже зачастую неприемлемых затрат оперативной памяти ПК.

Выводы

Рассмотрено влияние выбора количества электродов на поверхности торса на результаты реконструкции распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда. Получены оценки количества электродов и оптимального коэффициента регуляризации при различных размерах неоднородностей в распределении потенциала.

В целом можно заключить, что рассматриваемая методика позволяет реконструировать неоднородности на поверхности эпикарда с размерами более 3 см при количестве электродов порядка 40. Для неоднородностей с меньшими размерами необходимо располагать электродами в количестве 60 и более.

Библиографический список

1. Амиров, Р. З. Электрокардиотопография / Р. З. Амиров. – Москва : Медицина, 1965. – 142 с.
2. Полякова, И. П. Поверхностное ЭКГ – картирование как метод диагностики нарушений сердечного ритма сердца / И. П. Полякова, А. В. Ардашев // Клиническая аритмология. – Москва : Медпрактика-М, 2009. – Гл. 6. – С. 157–175.
3. Крамм, М. Н. Анализ влияния выбора количества электродов на карты распределения электрического потенциала на поверхностях торса и квазиэпикарда / М. Н. Крамм // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (33). – С. 61–68.
4. Патент РФ № 2651068. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н., Жихарева Г. В., Крамм М. Н. и др. – 2018. – Бюл. № 11. – 7 с.
5. Титомир, Л. И. Неинвазивная электрокардиотопография / Л. И. Титомир, В. Г. Трунов, Э. А. И. Айду. – Москва : Наука, 2003. – 198 с.
6. Comprehensive Electrocardiology / P. W. Macfarlane, A. van Oosterom, O. Pahlm, P. Kligfield, M. Janse, J. Camm. – London : Springer, 2011. – Chapter 9. – P. 300–343.
7. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – Москва : Наука, 1979. – 285 с.
8. Титомир, Л. И. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца / Л. И. Титомир, П. Кнеппо. – Москва : Наука. Физматлит, 1999. – 447 с.
9. Леонов, А. С. Решение некорректно поставленных обратных задач: Очерк теории, практические алгоритмы и демонстрации / А. С. Леонов. – Москва : Либроком, 2010. – 336 с.
10. Throne, R. D. The effects of errors in assumed conductivities and geometry on numerical solutions to the inverse problem of electrocardiology / R. D. Throne, L. G. Olson // IEEE Trans Biomed Eng. – 1995. – Vol. 42 (12) – P. 1192–1200.
11. Reconstruction of equivalent electrical sources on heart surface / G. V. Zhikhareva, M. N. Kramm, O. N. Bodin, R. Seepold, A. I. Chernikov, Y. A. Kupriyanova, N. A. Zhuravleva // IWBBIO 2018 : proceedings of 6th International Work-Conference (Granada, Spain, April 25–27, 2018). – 2018. – Part I.
12. Zhikhareva, G. Reconstruction of Current Sources of Heart in the ECG Inverse Problem / G. Zhikhareva, M. Kramm // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, 2012. – 148 p.

References

1. Amirov R. Z. *Elektrokardiotopografiya* [Electrocardiografia]. Moscow: Meditsina, 1965, 142 p. [In Russian]
2. Polyakova I. P., Ardashev A. V. *Klinicheskaya aritmologiya* [Clinical Arrhythmology]. Moscow: Medpraktika-M, 2009, chapter 6, pp. 157–175. [In Russian]
3. Kramm M. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 3 (33), pp. 61–68. [In Russian]
4. Patent RF № 2651068. *Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa* [Russian patent no. 2651068. Method for noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart]. Bodin O. N., Zhikhareva G. V., Kramm M. N. et al. 2018, bull. no. 11, 7 p. [In Russian]
5. Titomir L. I., Trunov V. G., Aydu E. A. I. *Neinvazivnaya elektrokardiotopografiya* [Non-invasive electrocardiography]. Moscow: Nauka, 2003, 198 p. [In Russian]
6. Macfarlane P. W., van Oosterom A., Pahlm O., Kligfield P., Janse M., Camm J. *Comprehensive Electrocardiology*. London: Springer, 2011, chapter 9, pp. 300–343.
7. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow: Nauka, 1979, 285 p. [In Russian]
8. Titomir L. I., Kneppo P. *Matematicheskoe modelirovanie bioelektricheskogo generatora serdtsa* [Mathematical modeling of a bioelectric heart generator]. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1999, 447 p. [In Russian]
9. Leonov A. S. *Reshenie nekorrektno postavlennykh obratnykh zadach: Ocherk teorii, prakticheskie algoritmy i demonstratsii* [The solution of ill-posed inverse problems: an Essay on the theory, practical algorithms, and demonstrations]. Moscow: Librokom, 2010, 336 p. [In Russian]
10. Throne R. D., Olson L. G. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1995, vol. 42 (12), pp. 1192–1200.
11. Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Bodin O. N., Seepold R., Chernikov A. I., Kupriyanova Y. A., Zhuravleva N. A. *IWBBIO 2018: proceedings of 6th International Work-Conference (Granada, Spain, April 25–27, 2018)*. 2018, part I.
12. Zhikhareva G., Kramm M. *Reconstruction of Current Sources of Heart in the ECG Inverse Problem*. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, 2012, 148 p.

Крамм Михаил Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва,
ул. Красноказарменная, 14)
E-mail: KrammMN@mail.ru

Kramm Mikhail Nikolaevich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of radio engineering
fundamentals,
National Research University «MPEI»
(14 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Крамм, М. Н. Анализ влияния выбора количества электродов на результаты реконструкции распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда / М. Н. Крамм // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 78–85. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-6.